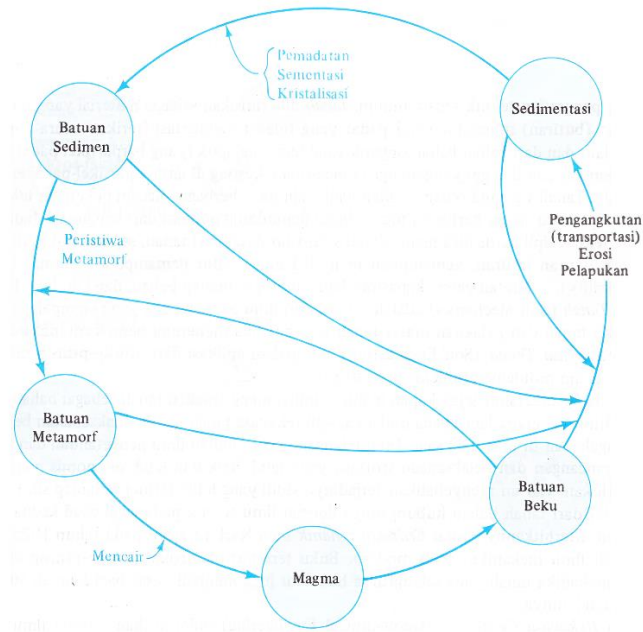


BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

Tanah merupakan material alam yang tersusun atas kumpulan butiran mineral padat yang tidak saling terikat secara kimia, serta mengandung bahan organik hasil pelapukan yang berwujud partikel padat, serta cairan dan gas yang mengisi pori-pori antara partikel-partikel tersebut (Das, 1995).

Partikel mineral penyusun fase padat tanah tersebut berasal dari proses pelapukan batuan induk. Variasi ukuran, bentuk, dan komposisi kimia dari setiap butiran sangat menentukan sifat fisik tanah. Berdasarkan asal usulnya, batuan dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis dasar yaitu batuan beku (*igneous rocks*), batuan sedimen (*sedimentary rock*), dan batuan metamorf (*metamorphic rocks*). Transformasi antar jenis batuan tersebut digambarkan pada diagram yang disebut siklus batuan seperti pada Gambar 2.1.

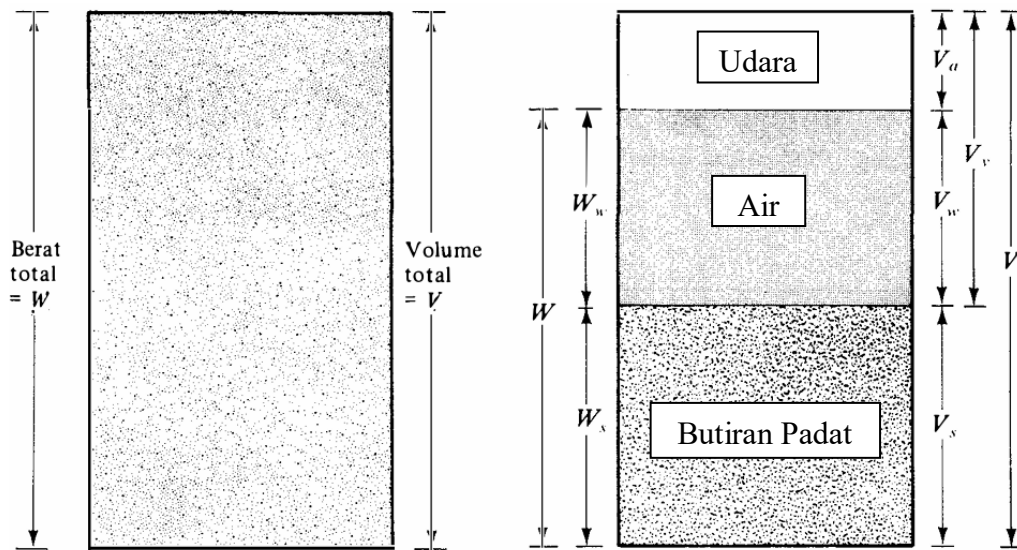


Gambar 2.1 Siklus Batuan

(Sumber: Das, 1995)

Unsur udara umumnya tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat teknis tanah, sedangkan keberadaan air memiliki peran yang sangat besar terhadap perilaku dan karakteristik mekaniknya. Apabila seluruh pori terisi air, maka tanah

berada pada kondisi jenuh, sedangkan apabila hanya sebagian pori terisi air dan sebagian lainnya berisi udara, tanah disebut berada pada kondisi jenuh sebagian (*partially saturated*). Hubungan antara fase padat, cair, dan gas dalam tanah dapat digambarkan melalui diagram fase tanah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram Fase Tanah

(Sumber: Das, 1995)

2.1.1 Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah merupakan metode pengelompokan berbagai jenis tanah yang memiliki karakteristik serupa ke dalam kategori utama dan sub kategori tertentu berdasarkan tujuan penggunaannya. Melalui sistem ini, para ahli dapat menggunakan suatu bahasa teknis yang ringkas untuk menggambarkan sifat umum tanah yang sangat beragam tanpa perlu uraian yang terlalu mendetail. Sebagian besar sistem klasifikasi yang diterapkan dalam bidang rekayasa geoteknik didasarkan pada parameter indeks tanah sederhana, seperti distribusi ukuran butiran dan tingkat plastisitas. (Das, 1995).

Berdasarkan ukuran partikelnya tanah dapat diklasifikasikan menjadi empat yaitu kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau, (*silt*), dan lempung (*clay*). Menunjukkan klasifikasi tanah berdasarkan ukuran butir dari berbagai sumber.

Tabel 2.1 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Ukuran Butir

No	Name of Organization	Grain Size (mm)			
		Gravel	Sand	Silt	Clay
1	Massachusetts Institute of Technology (MIT)	> 2	2 – 0,06	0,06 – 0,002	< 0,002
2	U.S Department of Agriculture (USDA)	> 2	2 – 0,05	0,05 - 0,002	< 0,002
3	American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	76,2 - 2	2 – 0,075	0,075 – 0,002	< 0,002
4	Unified Soil Classification System (USCS)	76,2 – 4,75	4,75 – 0,075	< 0,075	< 0,075

(Sumber: Das, 1995)

Pengklasifikasian tanah pada umumnya dapat dilakukan dengan dua cara yaitu *Unified Soil Classification System* (USCS) dan *American Association of State Highway Officials* (AASHTO).

2.1.1.1 Klasifikasi Tanah Menurut USCS

Unified Soil Classification System (USCS) merupakan metode klasifikasi tanah yang banyak digunakan dalam geoteknik untuk mengelompokkan tanah berdasarkan sifat fisik serta karakteristik butirannya. Tanah dibedakan menjadi dua kelompok utama berdasarkan persentase butiran yang lolos saringan No. 200, yaitu tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus. Jika kurang dari 50% material lolos saringan No. 200, tanah digolongkan sebagai tanah berbutir kasar (kerikil dan

pasir). Sebaliknya, jika lebih dari 50% material lolos saringan No. 200, tanah dikategorikan sebagai tanah berbutir halus (lanau atau lempung).

Simbol-simbol utama pada sistem klasifikasi USCS meliputi:

G : *Gravel* (kerikil)

S : *Sand* (pasir)

M : *Silt* (lanau)

C : *Clay* (lempung)

O : *Organic soil* (tanah organik)

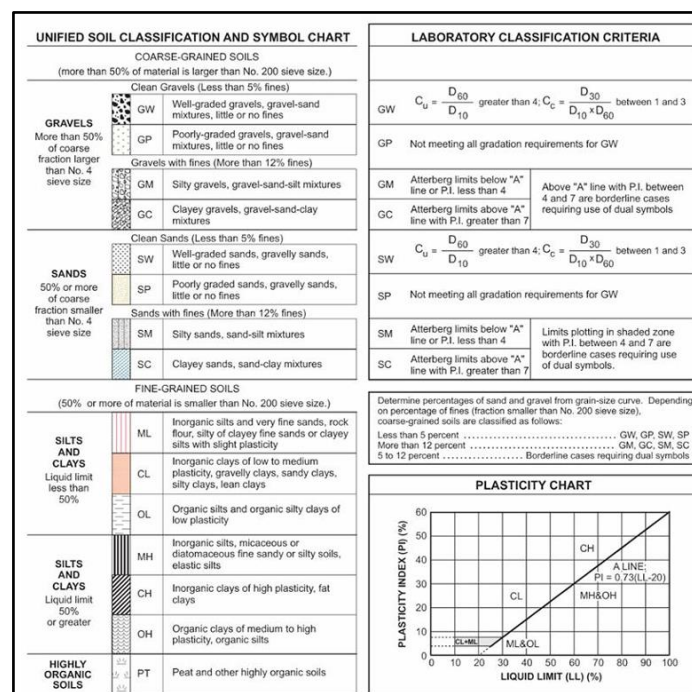
Pt : *Peat* (gambut)

W : *Well graded* (gradasi baik)

P : *Poorly graded* (gradasi buruk)

L : *Low plasticity* (plastisitas rendah)

H : *High plasticity* (plastisitas tinggi)



Gambar 2.3 Klasifikasi Tanah Menurut USDA

(Sumber: Das, 1995)

2.1.1.2 Klasifikasi Tanah menurut AASHTO

Sistem klasifikasi AASHTO digunakan untuk menentukan kualitas tanah dalam perancangan timbunan jalan, subbase, dan subgrade. Sistem ini membagi tanah ke dalam 7 kelompok, A-1 sampai A-7 yang dapat dilihat Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sistem Klasifikasi AASHTO

Klasifikasi Umum	Tanah Berbutir (35 Atau Kurang Dari Seluruh Contoh Tanah Lolos Ayakan No. 200)							Tanah Lempung-Lanau (Lebih Dari 35 % Dari Seluruh Contoh Tanah Lolos Ayakan No. 200)			
Klasifikasi Kelompok	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 *
Analisis ayakan (% lolos)	≤ 50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
No. 10	≤ 30	≤ 50	≤ 51	-	-	-	-	-	-	-	-
No. 40	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36
No. 200											
Sifat fraksi yang lolos ayakan	-		-	≤ 41	≥ 41	≤ 40	≥ 40	≤ 40	≤ 41	≤ 40	≥ 40

Klasifikasi Umum	Tanah Berbutir (35 Atau Kurang Dari Seluruh Contoh Tanah Lolos Ayakan No. 200)						Tanah Lanau-Lempung (Lebih Dari 35 % Dari Seluruh Contoh Tanah Lolos Ayakan No. 200)			
No. 40 batas cair (LL) Indeks elastisitas (PI)	≤ 6	NP	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah, kerikil dan pasir	Pasir halus	Kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung				Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian sebagai bahan dasar tanah	Baik sekali sampai baik						Sedang sampai jelek			

(Sumber: Das, 1995)

2.1.2 Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah merupakan rangkaian kegiatan yang bertujuan untuk memperoleh informasi mengenai daya dukung tanah, karakteristik fisik dan mekanik tanah, serta kondisi geologi di lokasi rencana pembangunan. Melalui kegiatan ini dapat diketahui susunan dan sifat tiap lapisan tanah, kekuatan tanah dasar, tingkat kepadatan, serta sifat korosivitasnya.

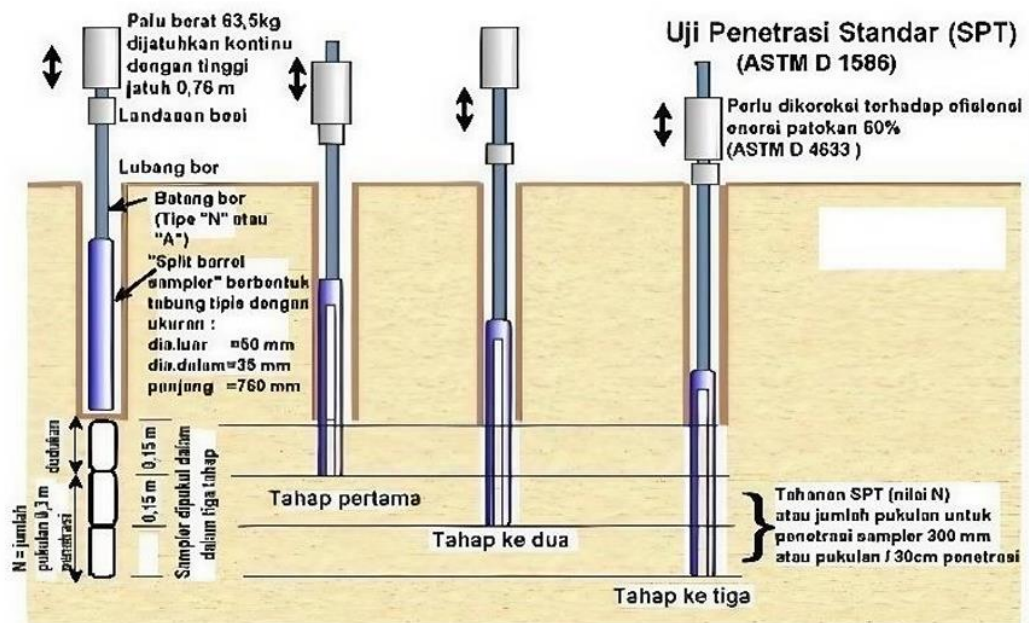
Data penyelidikan tanah menjadi dasar penentuan jenis, kedalaman, dan dimensi pondasi yang aman dan ekonomis, sekaligus menentukan perlakuan atau perbaikan tanah yang diperlukan agar mampu menahan beban konstruksi. Karena itu, penyelidikan tanah merupakan tahap penting sebelum pekerjaan struktur, guna memastikan perencanaan fondasi yang stabil, kokoh, dan tahan gempa sehingga menjamin kenyamanan dan keselamatan pengguna bangunan.

Penyelidikan tanah (*soil investigation*) ada dua jenis yaitu:

1. Penyelidikan di lapangan (*in situ test*), Jenis penyelidikan di lapangan seperti pengeboran (*hand boring* ataupun *machine boring*), *Cone Penetrometer Test* (sondir), SPT, *Sand Cone Test* dan *Dynamic Cone Penetrometer*.
2. Penyelidikan di laboratorium (*laboratory test*), Jenis penyelidikan di laboratorium terdiri dari uji *index properties* tanah (*Atterberg Limit*, *Water Content*, *Specific Gravity*, *Sieve Analysis*) dan *engineering properties* tanah (*direct shear test*, *triaxial test*, *consolidation test*, *permeability test*, *compaction test*, dan CBR).

2.1.3 Pengujian *Standard Penetration Test* (SPT)

Standard Penetration Test (SPT) merupakan metode pengujian lapangan yang dilakukan bersamaan dengan proses pengeboran untuk menilai ketahanan dinamis tanah serta memperoleh contoh tanah terganggu melalui teknik penumbukan (Nasional, 2008). *Standard Penetration Test* (SPT) dilakukan pada setiap lubang bor teknik dengan interval 2 m. Ilustrasi pelaksanaan SPT dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Penetrasi dengan SPT

(Sumber: SNI 4153:2008)

Kemudian hasil dari pekerjaan bor dan SPT dituangkan dalam lembaran *drilling log*. Uji SPT dapat dihentikan jika jumlah pukulan melebihi 50 kali sebelum penetrasi 30 cm tercapai. Berikut beberapa tujuan dari percobaan SPT yaitu:

1. Untuk menentukan kepadatan relatif (D_r) serta sudut geser dalam (ϕ) dari setiap lapisan tanah berdasarkan hasil pengambilan contoh tanah menggunakan tabung contoh.
2. Untuk mengidentifikasi jenis tanah dan ketebalan dari masing-masing lapisan tanah berdasarkan hasil pengujian penetrasi lapangan.
3. Untuk memperoleh data kumulatif perlawanan penetrasi tanah, serta menentukan tingkat kepadatan tanah tidak berkohesi yang umumnya sulit diperoleh melalui pengambilan sampel langsung.

Nilai NSPT kemudian dikorelasikan dengan parameter kepadatan relatif dan sudut geser sebagaimana tercantum pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Hubungan D_r , ϕ dan N dari Pasir (Peck, Mayerhoff)

Nilai N	Kepadatan Relatif (D_r)		Sudut Geser Dalam (ϕ)	
			Menurut Peck	Menurut Meyerhoff
0-4	0,00-0,20	Sangat lepas	<28,5	<30
4-10	0,20-0,40	Lepas	28,5-30	30-35
10-30	0,40-0,60	Sedang	30-36	35-40
30-50	0,60-0,80	Padat	36-41	40-45
>50	0,80-1,00	Sangat padat	>41	>45

(Sumber: Das, 1998)

2.1.4 Parameter Tanah

Parameter tanah merupakan suatu ukuran atau acuan yang digunakan untuk menilai dan memahami perubahan yang terjadi dalam tanah, baik dari segi sifat fisik maupun jenis tanah. Parameter tanah dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu parameter fisik dan parameter mekanis.

Parameter fisik tanah mencakup berbagai karakteristik, seperti berat jenis, porositas, distribusi ukuran butir tanah, berat isi, derajat kejenuhan, kepadatan, kadar air, nilai Atterberg, serta permeabilitas. Sementara itu, parameter mekanis tanah meliputi nilai kohesi, sudut geser tanah, dan daya dukung tanah.

2.1.4.1 Berat Isi Tanah (γ)

Nilai korelasi berat volume tanah normal dan saturasi dapat diinterpolasikan berdasarkan nilai korelasi yang disesuaikan dengan nilai N-SPT lapisan tanah.

Tabel 2.4 Nilai Tipikal Berat Volume Tanah Normal dan Saturasi

Soils Type		Bulk Unit Weight (kN/m³)		Saturated Unit Weight (kN/m³)	
		Loose	Dense	Loose	Dense
Granular Soils	<i>Gravel</i>	16,0	18,0	0,0	21,0
	<i>Well graded sand and Gravel</i>	19,0	21,0	1,5	23,0
	<i>Coarse or medium sand</i>	16,5	18,5	0,0	21,5
	<i>Well graded sand and gravel</i>	18,0	21,0	0,5	22,5
	<i>Fine or silty sand</i>	17,0	19,0	0,0	21,5
	<i>Rock fill</i>	15,0	17,5	9,5	21,0
	<i>Brick Hardcore</i>	13,0	17,5	6,5	19,0
	<i>Slag fil</i>	12,0	15,0	8,0	20,0
	<i>Ash fill</i>	6,5	10,0	3,0	15,0
Cohesive soils	<i>Peat</i>	12,0		12,0	
	<i>Organic clay</i>	15,0		15,0	
	<i>Soft clay</i>	17,0		17,0	
	<i>Firm clay</i>	18,0		18,0	
	<i>Stiff clay</i>	19,0		19,0	
	<i>Hard clay</i>	20,0		20,0	
	<i>Stiff or hard glacial clay</i>	21,0		21,0	

(Sumber: Das, 1998)

2.1.4.2 Kohesi (C_u)

Kohesi merupakan gaya tarik menarik antar partikel tanah. Bersama dengan sudut geser dalam, kohesi merupakan kuat geser tanah yang menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah dalam hal ini berupa gerakan lateral tanah. Deformasi ini terjadi akibat kombinasi keadaan kritis pada tegangan normal dan tegangan geser yang tidak sesuai dengan faktor

aman dari yang direncanakan. Nilai ini didapat dari pengujian Triaksial dan pengujian *Direct Shear*.

Tabel 2.5 Variasi Korelasi N-SPT dengan c_u Tanah Lempung

Consistency	N	c_u (kN/m ³)
<i>Very soft</i>	0-2	< 12
<i>Soft</i>	2-4	12-25
<i>Medium</i>	4-8	25-50
<i>Stiff</i>	8-15	50-100
<i>Very stiff</i>	15-30	100-200
<i>Hard</i>	>30	>200

(Sumber: Das, 1998)

2.1.4.3 Sudut Geser (ϕ)

Sudut geser adalah sudut kemiringan bidang geser maksimum pada saat tanah mulai bergeser atau terjadi pergerakan tanah. Sudut geser bergantung pada kohesi dan kekuatan geser antar partikel tanah.

Tabel 2.6 Korelasi q_c dan D_r dengan sudut Geser dalam Tanah

<i>State of packing</i>	<i>Relative density</i>	<i>N-SPT</i>	<i>q_c in MPa</i>	<i>Approximate triaxial friction angle (degrees)</i>
<i>Very loose</i>	<0,2	<4	<2	<30
<i>Loose</i>	0,2-0,4	4-10	2-4	30-35
<i>Medium dense</i>	0,4-0,6	10-30	4-12	35-40
<i>Dense</i>	0,6-0,8	30-50	12-20	40-45
<i>Very dense</i>	>0,8	>50	>20	>45

(Sumber: Das, 1998)

2.1.4.4 Sudut Geser Efektif (ϕ') dan Kohesi Efektif (c')

Kohesi efektif (c') adalah parameter yang mengukur kekuatan tanah dari efek tekanan air dalam tanah. Kohesi efektif dapat dihitung dengan mengurangi tekanan air dalam tanah dari kohesi total. Sudut geser efektif (ϕ') adalah sudut kemiringan bidang geser maksimum pada saat tekanan air di dalam tanah diambil

ke dalam pertimbangan. Sudut geser efektif bergantung pada kohesi efektif dan kekuatan geser efektif antar partikel tanah.

Tabel 2.7 Kohesi Efektif dan Sudut Geser Efektif Tanah

Soil Group	Typical Soils in Group	Soil Parameters	
		c' (kPa)	ϕ' (degrees)
<i>Poor</i>	<i>Soft and firm clay of medium to high plasticity; silty clays; loose variable clayey fills; loose sandy silts</i>	0 - 5	17 - 25
<i>Average</i>	<i>Stiff sandy clays; gravelly clays; compact clayey sands and sandy silts; compacted clay fills</i>	0 - 10	26 - 32
<i>Good</i>	<i>Gravelly sands; compacted sands; controlled crushed sandstone and graveled fills; dense well graded sands</i>	0 - 5	32 - 37
<i>Very Good</i>	<i>Weak weathered rock; controlled fills of road base; gravel and recycled concrete</i>	0 - 25	36 - 43

(Sumber: Das, 1998)

2.1.4.5 Angka Pori (e_0)

Angka pori awal adalah rasio antara perubahan volume yang terjadi pada tanah terhadap volume awal tanah, ketika tanah itu mulai mengalami deformasi. Angka pori menunjukkan seberapa besar ruang kosong yang disebut pori-pori tanah terhadap ruang padat. Nilai ini merupakan hubungan volume tanah yang umum dipakai, didefinisikan sebagai perbandingan antara volume pori (VV) dan volume butiran padat (VS) yang disebut angka pori.

Tabel 2.8 Nilai Tipikal Angka Pori, Kadar Air, dan Berat Isi Kering

<i>Type of Soil</i>	<i>Void Ratio</i>	<i>Natural Moisture content in a saturated state (%)</i>	<i>Dry unit weight, γ_d (kN/m³)</i>
<i>Loose uniform sand</i>	0,8	30	14,5
<i>Dense uniform sand</i>	0,45	16	18
<i>Loose angular-grained silty sand</i>	0,65	25	16
<i>Dense angular-grained silty sand</i>	0,4	15	19
<i>Stiff clay</i>	0,6	21	17
<i>Soft clay</i>	0,9 – 1,4	30 – 50	11,5 – 14,5
<i>Loess</i>	0,9	25	13,5
<i>Soft organic clay</i>	1,5 – 3,2	90 – 120	6 – 8
<i>Glacial till</i>	0,3	10	21

(Sumber: Das, 1998)

2.1.4.6 Indeks Kompresi (C_c), *Swelling* (C_s), dan Indeks Rebound (C_r)

Indeks kompresi (C_c) adalah nilai parameter suatu tanah yang digunakan untuk memprediksi besarnya penurunan (*settlement*) tanah yang mengalami pemampatan akibat beban yang terjadi di atasnya.

Indeks swelling (C_s) adalah suatu metode pengujian sifat fisik tanah dengan mengamati tingkat ekspansi tanah yang berada di dalam suatu koloid yaitu air sulingan (air destilasi) dan minyak tanah (kerosin) dalam waktu 24 jam atau lebih. *Indeks Rebound* (C_r) adalah nilai yang digunakan untuk mendapatkan besarnya penurunan pada tanah lempung *over consolidated*.

Indeks *swelling* (C_s) dan Indeks *Rebound* (C_r) dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$C_s \approx \frac{1}{2} \text{ sampai } \frac{1}{10} C_c$$

Tabel 2.9 Nilai Indeks Kompresi

<i>Type of Clay</i>	<i>Descriptive term</i>	<i>Coefficient of volume compressibility, m_v (m²/MN)</i>	<i>Compression index, C_c</i>
<i>Hard, heavily overconsolidated Glacial Till (Boulder Clay), stiff weathered rocks (e.g. completely weathered mudstone) and hard clays</i>	<i>Very low compressibility</i>	<i><0,05</i>	<i>0,025</i>
<i>Stiff glacial till (boulder clay), marls, very stiff tropical residual clays</i>	<i>Low compressibility</i>	<i>0,05 – 0,1</i>	<i>0,025 – 0,05</i>
<i>Firm clays, glacial outwash clays, consolidated lake deposits,</i>	<i>Medium compressibility</i>	<i>0,1 – 0,3</i>	<i>0,05 – 0,15</i>

(Sumber: Das, 1998)

2.1.4.7 Angka Poisson (μ)

Perbandingan antara kontraksi lateral terhadap regangan longitudinal, jika suatu bahan ditarik secara linear. Dengan kata lain, rasio ini menghitung perbandingan antara penyempitan benda terhadap pertambahan panjang akibat tarikan. Jadi, angka poisson adalah nilai perbandingan antara regangan horizontal dan regangan vertikal.

2.1.4.8 Modulus Elastisitas (E)

Nilai korelasi parameter modulus elastisitas dapat diinterpolasikan berdasarkan nilai korelasi pada Tabel 2.11 yang disesuaikan dengan nilai N-SPT lapisan tanah.

Tabel 2.10 Modulus Elastisitas Tanah

<i>Type</i>	<i>Strength of Soil</i>	<i>Elastic Modulus, E (MPa)</i>	
		<i>Short term</i>	<i>Long term</i>
<i>Gravel</i>	<i>Loose</i>	25 – 50	
	<i>Medium</i>	50 – 100	
	<i>Dense</i>	100 – 200	
<i>Medium to coarse sand</i>	<i>Very loose</i>	<5	
	<i>Loose</i>	3 – 10	
	<i>Medium dense</i>	8 – 30	
	<i>Dense</i>	25 – 50	
	<i>Very dense</i>	40 – 100	
<i>Fine sand</i>	<i>Loose</i>	5 – 10	
	<i>Medium</i>	10 – 25	
	<i>Dense</i>	25 – 30	
<i>Silt</i>	<i>Soft</i>	<10	<8
	<i>Stiff</i>	10 – 20	8 – 15
	<i>Hard</i>	>20	>15
<i>Clay</i>	<i>Very soft</i>	<3	<2
	<i>Soft</i>	2 – 7	1 – 5
	<i>Firm</i>	5 – 12	4 – 8
	<i>Stiff</i>	10 – 25	7 – 20
	<i>Very stiff</i>	20 – 50	15 – 35
	<i>Hard</i>	40 – 80	30 – 60

(Sumber: Das, 1998)

2.2 Fondasi

Fondasi didefinisikan sebagai bagian dari sistem rekayasa yang berfungsi menyalurkan beban dari struktur ke tanah atau batuan dasar yang mendasarinya, termasuk berat fondasi itu sendiri. Fondasi bertugas mentransmisikan beban ke

lapisan tanah dengan cara yang aman sehingga tidak melampaui kapasitas daya dukung tanah serta menjaga deformasi tanah dalam batas yang dapat diterima (Bowles, 1989).

Menurut (Bowles, 1989), sebuah fondasi harus memenuhi beberapa pertimbangan tambahan agar stabil dan aman, yaitu:

1. Kedalaman fondasi harus memadai untuk mencegah terjadinya pergeseran lateral tanah dari bawah fondasi, terutama pada fondasi tapak dan fondasi rakit. Penggalian fondasi juga perlu memperhatikan bangunan di sekitar agar tidak menimbulkan retakan akibat perubahan tekanan tanah.
2. Kedalaman fondasi harus berada di bawah zona perubahan volume musiman, yang disebabkan oleh pembekuan, pencairan, dan pertumbuhan akar tanaman. Ketentuan ini biasanya tercantum dalam standar atau peraturan bangunan setempat.
3. Fondasi harus mempertimbangkan kondisi tanah ekspansif, yaitu tanah yang dapat mengembang karena peningkatan kadar air akibat kondensasi uap air di bawah bangunan. Kondisi ini dapat menyebabkan pengangkatan fondasi (*heave*) dan gangguan stabilitas struktur.
4. Sistem fondasi harus aman terhadap gaya luar, termasuk gaya guling (*overturning*), gaya geser (*sliding*), serta gaya angkat (*uplift*) yang dapat mengancam kestabilan konstruksi.
5. Fondasi harus dilindungi dari korosi dan kerusakan kimia, terutama di area dengan kandungan bahan berbahaya seperti lahan reklamasi, lingkungan laut, atau bekas tempat pembuangan sampah yang dapat merusak baja, kayu, maupun beton.
6. Sistem fondasi harus mampu beradaptasi terhadap perubahan geometri konstruksi atau kondisi lapangan, dan mudah dimodifikasi apabila terjadi perubahan pada struktur atas atau beban kerja.
7. Fondasi harus dapat dibangun dengan sumber daya dan tenaga kerja yang tersedia di lapangan, serta dilaksanakan melalui koordinasi yang baik antar pihak untuk menjamin hasil yang aman dan sesuai desain.

Fondasi memiliki beberapa fungsi utama sebagai berikut:

1. Menyalurkan beban dari struktur atas ke tanah pendukung, baik beban mati, beban hidup, maupun beban lateral, sehingga tekanan yang diterima tanah tidak melebihi kapasitas daya dukungnya.
2. Menjaga kestabilan struktur secara keseluruhan, dengan mencegah terjadinya pergeseran, penggulingan, atau pengangkatan akibat gaya eksternal seperti angin, gempa, dan tekanan air tanah.
3. Mengontrol penurunan (*settlement*) agar terjadi secara merata dan dalam batas toleransi yang dapat diterima oleh elemen struktur atas.
4. Menyebarkan beban secara merata ke lapisan tanah yang lebih luas, sehingga tegangan yang bekerja di bawah fondasi dapat dikurangi dan tidak menimbulkan keruntuhan geser pada tanah.
5. Berfungsi sebagai pengikat struktur bawah dan atas, memberikan kekakuan tambahan terhadap sistem struktur serta membantu menahan gaya horizontal dari kolom atau dinding geser.
6. Melindungi struktur dari pengaruh lingkungan bawah tanah, seperti perubahan kadar air, gaya apung, korosi, dan reaksi kimia tanah terhadap material beton maupun baja tulangan.

2.2.1 Jenis-jenis Fondasi

Pemilihan jenis fondasi sebagai bagian dari struktur bawah dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti kondisi tanah di lokasi proyek, besar beban yang harus dipikul fondasi, ketentuan peraturan yang berlaku, efisiensi biaya, serta kemudahan dalam pelaksanaannya.

Berdasarkan kedalaman elevasinya, fondasi dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu fondasi dangkal (*shallow foundation*) dan fondasi dalam (*deep foundation*) (Bowles, 1989).

1. Fondasi dangkal merupakan elemen struktur paling bawah yang berfungsi menyalurkan beban dari bangunan ke lapisan tanah keras yang terletak relatif dekat dengan permukaan tanah. Secara klasik, fondasi dikatakan dangkal apabila kedalamannya (D_f) lebih kecil atau sama dengan lebar fondasi (B). Namun, seiring perkembangan konsep perencanaan, fondasi

masih dikategorikan sebagai fondasi dangkal meskipun kedalamannya mencapai tiga hingga empat kali lebar fondasi ($3B-4B$).

2. Fondasi dalam adalah struktur bawah yang menyalurkan beban konstruksi ke lapisan tanah keras yang berada jauh di bawah permukaan tanah. Jenis fondasi ini digunakan apabila perbandingan antara kedalaman dan lebar fondasi melebihi sepuluh ($Df/B \geq 10$), yang menunjukkan bahwa beban utama ditransfer ke lapisan tanah yang lebih dalam dan memiliki daya dukung lebih tinggi.

Jenis-jenis fondasi secara umum dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok, yaitu fondasi sumuran dan fondasi tiang.

1. Fondasi sumuran (*pier foundation*) merupakan peralihan antara fondasi dangkal dan fondasi tiang, digunakan ketika lapisan tanah keras berada cukup jauh dari permukaan tanah.
2. Fondasi tiang (*pile foundation*) digunakan jika tanah dangkal tidak mampu menahan beban dan lapisan keras berada sangat dalam. Fondasi ini terbuat dari kayu, beton, atau baja dengan diameter lebih kecil namun panjang lebih besar dibanding fondasi sumuran

Klasifikasi fondasi tiang berdasarkan metode pelaksanaannya dibedakan menjadi dua jenis, yaitu sebagai berikut (Hardiyatmo, 2011):

1. Tiang pancang (*driven pile*), yaitu tiang yang dipasang dengan cara memancang elemen berbentuk silinder atau persegi panjang yang telah dicetak sebelumnya ke dalam tanah hingga mencapai kedalaman atau lapisan tanah keras yang diinginkan.
2. Tiang bor (*bore pile*), yaitu tiang yang dibuat dengan cara mengebor tanah terlebih dahulu hingga kedalaman tertentu, kemudian dimasukkan tulangan baja ke dalam lubang bor, dan selanjutnya dilakukan pengecoran beton di tempat (*cast in situ*).

2.2.2 Fondasi *Bore Pile*

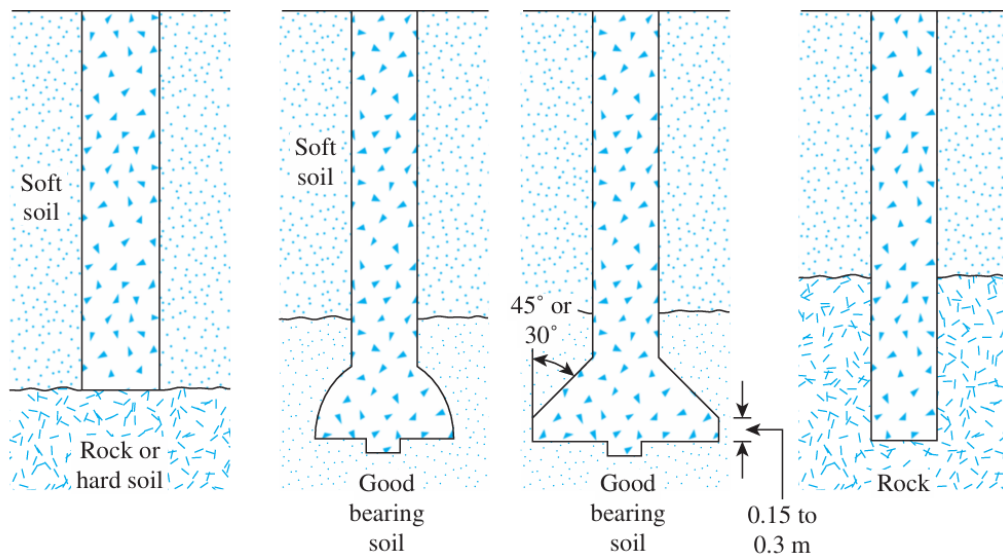
Fondasi *bore pile* merupakan salah satu jenis fondasi tiang yang umum digunakan pada konstruksi bangunan bertingkat atau struktur dengan beban besar

(Das, 1998). Penggunaan fondasi ini menjadi alternatif ketika kondisi lokasi proyek tidak memungkinkan atau berisiko tinggi untuk menggunakan fondasi tiang pancang.

Dari sisi teknologi, fondasi *bore pile* memiliki sejumlah keunggulan, antara lain proses mobilisasi yang lebih mudah karena dicetak langsung di tempat (*cast in situ*), hanya memerlukan alat bor dan perakitan tulangan baja, serta minim getaran sehingga tidak menimbulkan gangguan atau kerusakan pada bangunan di sekitarnya.

Fondasi *bore pile* dirancang untuk menyalurkan beban struktur ke lapisan tanah keras yang berada pada kedalaman tertentu. Berdasarkan fungsinya dalam mendistribusikan beban, jenis-jenis fondasi *bore pile* dapat dibedakan sebagai berikut:

1. *Bore Pile* lurus untuk tanah keras.
2. *Bore Pile* yang ujungnya diperbesar berbentuk bel.
3. *Bore Pile* yang ujungnya diperbesar berbentuk trapesium.
4. *Bore Pile* lurus untuk tanah berbatu-batuan.



Gambar 2.5 Jenis-jenis Fondasi *Bore Pile*

(Sumber: Das, 1998)

Penggunaan fondasi *bore pile* memiliki beberapa keunggulan dan keterbatasan dibandingkan dengan fondasi tiang pancang, sebagai berikut:

1. Keunggulan fondasi *bore pile*:
 - a. Efisiensi struktur, karena satu *bore pile* tunggal dapat menggantikan sekelompok tiang beserta *pile cap*.
 - b. Pemasangan lebih mudah pada lapisan pasir padat dan kerikil dibandingkan tiang pancang.
 - c. Tidak menimbulkan getaran dan kebisingan, sehingga aman bagi bangunan di sekitar lokasi kerja.
 - d. Mengurangi kebutuhan beton dan tulangan dowel, karena kolom dapat langsung diletakkan di atas kepala *bore pile*.
 - e. Kedalaman tiang dapat divariasikan sesuai kebutuhan desain dan kondisi tanah.
 - f. Tanah dapat diperiksa langsung selama proses pengeboran untuk mencocokkan dengan hasil uji laboratorium.
 - g. Lebih ekonomis, karena tidak memerlukan banyak peralatan berat.
 - h. Diameter tiang dapat dibuat besar, bahkan ujung bawahnya dapat diperlebar untuk meningkatkan kapasitas dukung.
 - i. Tidak menyebabkan kenaikan muka tanah, sehingga aman bagi lingkungan sekitarnya.
2. Keterbatasan fondasi *bore pile*:
 - a. Pengecoran dipengaruhi kondisi cuaca, terutama saat hujan yang dapat menurunkan mutu beton.
 - b. Kesulitan pengecoran muncul jika terdapat air tanah, karena mutu beton sulit dikontrol.
 - c. Ketidakseragaman mutu beton di sepanjang tiang dapat menurunkan kapasitas dukung fondasi.
 - d. Aliran air ke dalam lubang bor dapat mengganggu kestabilan tanah di sekitarnya.
 - e. Diperlukan pemasangan selubung sementara (*temporary casing*) untuk mencegah kelongsoran dinding lubang bor.

2.2.3 Penyaluran Beban pada Fondasi *Bore Pile*

Berdasarkan mekanisme penyaluran beban ke tanah, fondasi *bore pile* dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama, yaitu fondasi dengan tahanan ujung, tahanan gesek, dan tahanan lekatan (El Sharief et al., 2021).

1. Fondasi tiang dengan tahanan ujung (*end bearing pile*)

Jenis fondasi ini menyalurkan beban struktur melalui ujung bawah tiang ke lapisan tanah keras atau batuan yang memiliki kapasitas dukung tinggi. Biasanya, tiang jenis ini menembus lapisan tanah lunak terlebih dahulu sebelum mencapai lapisan tanah keras di bawahnya. Daya dukung utamanya berasal dari reaksi tanah keras di ujung tiang, sehingga penurunan yang terjadi relatif kecil.

2. Fondasi tiang dengan tahanan gesek (*friction pile*)

Pada tipe ini, beban struktur disalurkan melalui gesekan antara permukaan tiang dan tanah di sekitarnya. Daya dukung terutama berasal dari gaya gesek sepanjang sisi tiang, bukan dari ujungnya. Efektivitas fondasi ini sangat dipengaruhi oleh sifat fisik tanah: tanah berbutir kasar (pasir atau kerikil) akan menghasilkan gesekan yang lebih besar dibandingkan tanah berbutir halus (lempung).

3. Fondasi tiang dengan tahanan lekatan (*adhesive pile*)

Jenis fondasi ini bekerja melalui kombinasi tahanan gesek dan tahanan ujung, di mana sebagian beban dipikul oleh gaya adhesi antara permukaan tiang dan tanah, sedangkan sisanya ditransfer melalui reaksi pada ujung tiang. Mekanisme ini sering dijumpai pada tanah kohesif yang memiliki daya lekat tinggi terhadap permukaan tiang beton.

2.3 Daya Dukung Aksial *Bore Pile*

Kapasitas dukung tiang biasanya dinyatakan dalam satuan gaya (kN) karena bergantung pada gaya aksial yang diterima oleh elemen tiang. Istilah *pile capacity* atau *pile carrying capacity* sering digunakan untuk menggambarkan besarnya beban maksimum yang dapat ditahan oleh tiang secara aman. Oleh karena itu, kapasitas dukung ultimit dapat dirumuskan sebagai berikut:

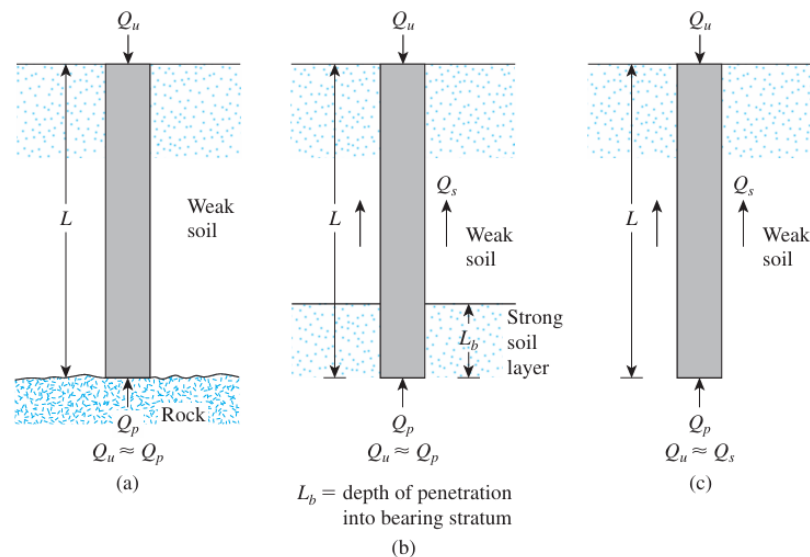
$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (2.1)$$

Dengan:

Q_u = Kapasitas dukung ultimit tiang (ton)

Q_p = Daya dukung ujung tiang (ton)

Q_s = Daya dukung selimut (ton)



Gambar 2.6 Visualisasi Kapasitas Daya Dukung Ultimit pada *Bore Pile*

(Sumber: Das, 1998)

2.3.1 Daya Dukung Ujung *Bore Pile*

Daya dukung ujung adalah kapasitas tanah atau batuan di bawah ujung fondasi dalam untuk menahan beban vertikal yang diteruskan dari struktur melalui tiang pancang atau fondasi bor. Ini adalah salah satu dari dua komponen utama daya dukung total fondasi dalam, yang lainnya adalah daya dukung gesekan sisi (*skin friction*).

2.3.1.1 Metode Decourt-Quaresma (1982)

Pada tanah berpasir, kapasitas dukung tiang bor cenderung meningkat seiring bertambahnya kedalaman hingga mencapai nilai maksimum pada kedalaman tertentu. Karena pasir memiliki kohesi efektif $c' = 0$, perhitungan daya dukung ujung tiang pada kondisi tersebut dapat ditentukan menggunakan formulasi yang dikembangkan Decourt-Quaresma sebagaimana dijelaskan oleh (Cintra et al., 1999).

$$Q_p = \alpha \cdot K_{dp} \cdot N \cdot A_p \quad (2.2)$$

Keterangan:

Q_p = Daya Dukung Ujung (kPa)

A_p = luas penampang ujung tiang

α = koefisien dasar tiang

K_{dp} = koefisien karakteristik tanah

N = Nilai N-SPT rata-rata 4B di atas hingga 4B di bawah dasar tiang.

Untuk variasi nilai koefisien α dan nilai koefisien K_{dp} dapat dilihat pada Tabel 2.11 dan Tabel 2.12.

Tabel 2.11 Nilai Koefisien α

<i>Piles</i>	<i>α for sand</i>	<i>α for clay</i>	<i>α for silt</i>
<i>Prefabricated driven piles or steel piles</i>	1	1	1
<i>Franki piles</i>	1	1	1
<i>Driven wooden piles</i>	1	1	1
<i>Vibrating or vibropressed</i>	1	1	1
<i>Cast in place screw piles</i>	1	1	1
<i>Prefabricated screw piles</i>	1	1	1
<i>Cast in place screw piles with additional grouting</i>	1	1	1
<i>Prefabricated screw piles with additional grouting</i>	1	1	1
<i>Steel tubular piles</i>	1	1	1
<i>Continuous flight auger piles (CFA)</i>	0,3	0,3	0,3
<i>Bored piles or piles sheeted by bentonite suspense</i>	0,5	0,85	0,6
<i>Bored piles with steel casing</i>	0,5	0,85	0,6

(Sumber: (Cintra et al., 1999)).

Tabel 2.12 Nilai Koefisien K_{dp}

No	<i>Soil Type</i>	K_{dp} (KPa)	No	<i>Soil Type</i>	K_{dp} (KPa)
1	<i>Sand</i>	400	9	<i>Clay silty – sandy</i>	120
2	<i>Sand clayey</i>	400	10	<i>Clay silty</i>	120

No	Soil Type	K _{dp} (KPa)	No	Soil Type	K _{dp} (KPa)
3	<i>Sand clayey – silty</i>	400	11	<i>Silty</i>	200
4	<i>Sand silty – clayey</i>	400	12	<i>Silty sandy - clayey</i>	250
5	<i>Sand silty</i>	400	13	<i>Silt sandy</i>	250
6	<i>Clay</i>	120	14	<i>Silty clayey - sandy</i>	200
7	<i>Clay – sandy</i>	120	15	<i>Silty clayey</i>	200
8	<i>Clay sandy – silty</i>	120			

(Sumber: (Cintra et al., 1999).

2.3.1.2 Metode Naval Engineering Facilities Command (NAVDOC)

Menurut NAVDOC, besarnya tahanan ujung pada tanah pasiran untuk fondasi tiang bor adalah sebesar $\frac{1}{3}$ dari Q_p yang didapat dari perhitungan tahanan ujung untuk fondasi tiang pancang.

$$Q_p = \frac{40N}{3} A_p \quad (2.3)$$

Q_p = Daya Dukung Ujung (kPa)

A_p = luas penampang ujung tiang

N = Nilai N-SPT

2.3.2 Daya Dukung Selimut *Bore Pile*

Daya Dukung Selimut adalah resistensi yang ditawarkan oleh tanah di sepanjang permukaan samping fondasi dalam, seperti tiang pancang atau fondasi bor, terhadap beban vertikal yang diteruskan dari struktur. Aspek ini sangat penting terutama ketika fondasi ditanam di tanah yang memiliki kekuatan yang bervariasi di kedalaman yang berbeda.

2.3.2.1 Metode Naval Engineering Facilities Command (NAVDOC)

Tahanan friksi pada tanah kohesif dapat ditentukan berdasarkan data hasil pengujian lapangan N-SPT. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung tahanan geser selimut tiang bor berdasarkan nilai N-SPT. Namun, dalam laporan Tugas Akhir ini digunakan metode yang dikembangkan oleh Naval Engineering Facilities Command (NAVDOC), karena metode tersebut memberikan hasil yang paling mendekati kondisi aktual di lapangan. Berdasarkan korelasi

empiris terhadap nilai N-SPT menurut NAVDOC, tahanan geser selimut tiang bor pada tanah berpasir dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$Q_s = 0,1 \times N - SPT \times \Delta L \times P \quad (2.4)$$

Keterangan:

Q_s = daya dukung selimut (Ton)

ΔL = tebal lapisan (m)

P = keliling tiang bor (m)

2.3.2.2 Metode Reese and Wright (1977)

Metode Reese and Wright (1977) merupakan salah satu pendekatan semi-empiris yang dikembangkan secara khusus untuk perencanaan tiang bor berdiameter besar (*large diameter drilled shafts*) pada tanah non-kohefif. Daya dukung selimut dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$q_s = 0,32N \times L \times \Delta L \times P \text{ untuk } N-SPT < 53 \quad (2.5)$$

$$q_s = \frac{N-53}{450} + 1,6 \text{ (t/ft}^2\text{) untuk } 53 < N-SPT \leq 100 \quad (2.6)$$

Dimana:

N = nilai SPT

L = tebal lapisan

ΔL = panjang tiang tertanam

P = keliling tiang

2.3.3 Daya Dukung Izin *Bore Pile*

Kapasitas dukung izin fondasi tiang untuk beban aksial (Q_a atau Q_{all}) diperoleh dengan cara membagi daya dukung ultimit (Q_u atau Q_{ult}) terhadap suatu faktor keamanan (FK). Faktor keamanan ini dapat diterapkan secara keseluruhan, ataupun secara terpisah pada daya dukung selimut tiang (*skin friction*) dan tahanan ujung tiang (*end bearing resistance*). Secara umum, kapasitas dukung tiang menggambarkan kemampuan tiang dalam menahan dan mentransfer beban dari struktur ke tanah pendukung di bawahnya.

Daya dukung ijin pada tiang dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FK} \quad (2.7)$$

Dimana:

Q_u = Daya dukung ultimit

FK = Faktor keamanan

2.4 Uji Pembebanan *Bore Pile*

2.4.1 Pengujian Pembebanan Statis

Pengujian beban aksial tiang dilakukan dengan memberi beban vertikal pada tiang sesuai beban kerja rencana untuk mengetahui besarnya defleksi aksial berupa penurunan yang terjadi akibat beban tersebut (Dai & Gong, 2022). Penurunan diukur dari posisi netral awal hingga posisi netral setelah tiang mengalami deformasi. Prosedur pengujian mengikuti standar ASTM D1143M-07, *Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load*. Tujuan pengujian adalah memastikan bahwa fondasi memiliki tingkat keamanan yang memadai untuk menahan beban struktur di atasnya sesuai persyaratan perencanaan.



Gambar 2.7 Pelaksanaan *Axial Static Loading Test*

2.4.1.1 Interpretasi Daya Dukung Aksial *Static Loading Test* (SLT) Tekan

Uji pembebanan aksial statik atau *Static Loading Test* (SLT) dilakukan berdasarkan standar ASTM D1143-07. Interpretasi kapasitas daya dukung ultimit

bore pile berdasarkan uji pembebanan statik dapat dilakukan dengan metode Davisson (1973), Chin (1971) dan Mazurkiewicz (1972).

1. Metode Davisson (1973)

Setelah kurva hubungan antara beban dan penurunan diperoleh dari hasil uji beban tiang, metode Davisson dapat digunakan untuk memperkirakan kapasitas ultimit tiang. Pada tanah berjenis lempung lunak, kondisi keruntuhan umumnya muncul ketika tiang menerima beban yang cenderung konstan namun disertai peningkatan penurunan yang sangat besar.

Davisson (1973) mengemukakan suatu metode yang kini banyak digunakan. Dalam pendekatan ini, kapasitas dukung ultimit tiang ditentukan berdasarkan nilai penurunan tertentu yang dijadikan kriteria penetapan batas kapasitas tiang.

$$\Delta = \frac{QL}{AE} \quad (2.8)$$

$$X = 0,15 + \frac{D}{120} \quad (2.9)$$

Dimana:

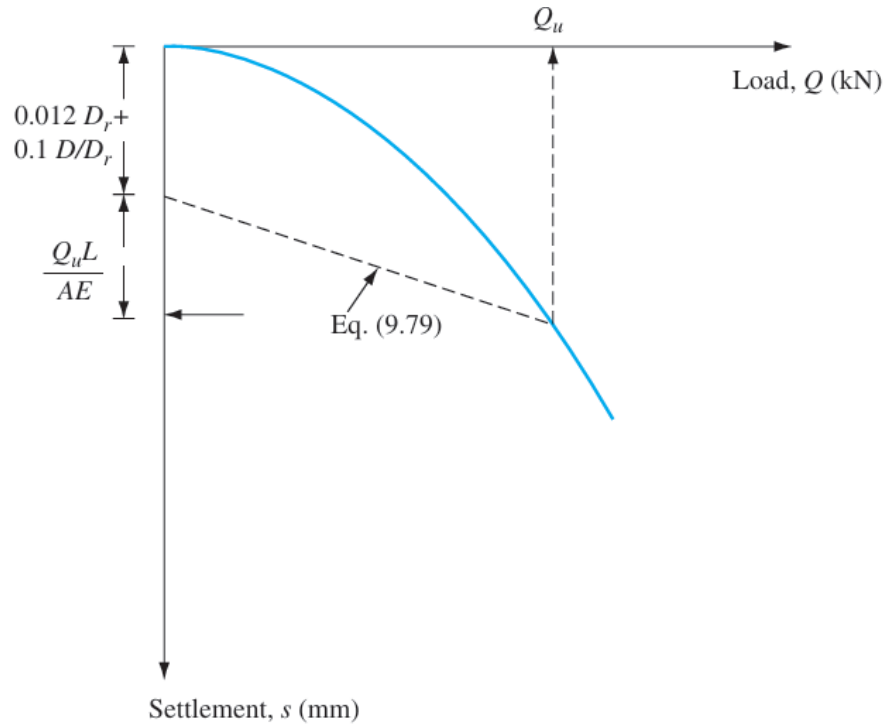
D = diameter tiang (inci)

Q = beban yang bekerja pada tiang

L = panjang tiang (mm)

A = luas penampang tiang (mm)

E = modulus elastisitas tiang (Ton/m)



(Sumber: Das, 1998)

Gambar 2.8 Grafik Interpretasi Metode Davisson(1973)

2. Metode Chin (1971)

Metode Chin dapat diterapkan pada kedua jenis pengujian beban, baik yang dilakukan secara cepat maupun secara perlahan. Namun, metode ini kerap menghasilkan gambaran kegagalan beban yang kurang realistis apabila pengujian tiang tidak dilakukan dengan interval waktu penambahan beban yang konstan. Dasar dari teori ini, diantaranya sebagai berikut:

a. Kurva *Load-settlement*

$$\frac{s}{Q} = C_1 S + C_2 \quad (2.10)$$

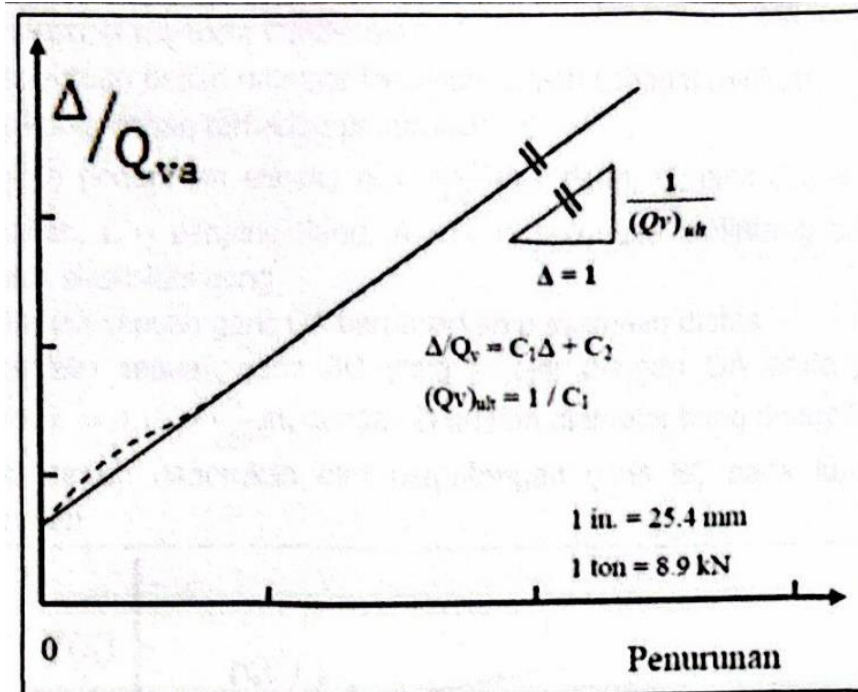
b. Kegagalan beban Q_f atau beban terakhir (Q_{ult})

$$Q_{ult} = \frac{1}{C_1} \quad (2.11)$$

Dimana:

S = Penurunan

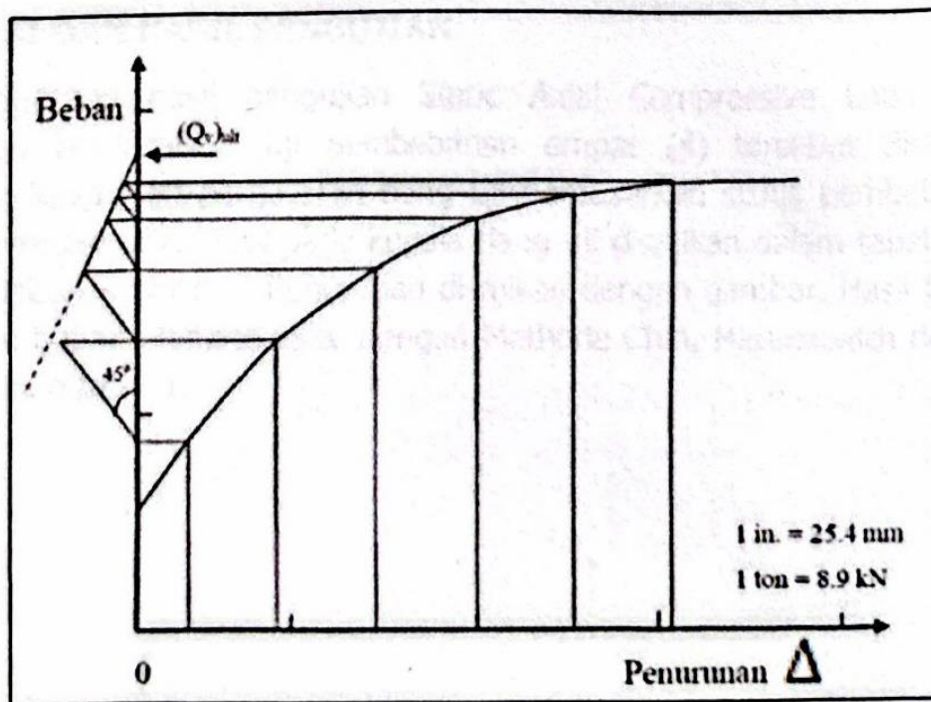
Q = Penambahan beban



Gambar 2.9 Grafik Interpretasi Metode Chin (1971)

3. Metode Mazurkiewicz (1972)

Metode ini beranggapan bahwa kapasitas tahanan maksimum (ultimit) dapat ditentukan dari titik perpotongan antara beban aksial sepanjang sumbu tiang dan garis yang dibentuk melalui titik-titik tertentu pada kurva beban–penurunan, yang ditarik membentuk sudut 45° terhadap sumbu beban pada bagian yang berbatasan dengan beban tersebut (Prakash, 2008).



Gambar 2.10 Grafik Interpretasi Metode Mazurkiewicz (1972)

2.4.2 Pengujian Pembebanan Dinamis

2.4.2.1 Daya Dukung *Bore Pile* Berdasarkan Data Hasil PDA

Pile Driving Analyzer (PDA) merupakan sistem pengujian dinamis yang memanfaatkan teknologi digital komputer untuk menganalisis respons tiang terhadap tumbukan palu. Alat ini bekerja dengan merekam data dari *strain transducer* dan *accelerometer* untuk memperoleh kurva hubungan antara gaya dan kecepatan pada saat tiang dipukul menggunakan palu dengan berat tertentu (BHD, 2009). Hasil pengujian PDA meliputi kapasitas dukung tiang, energi palu yang ditransfer, penurunan, serta parameter lainnya yang menunjukkan kinerja tiang saat menerima beban dinamis.

Pelaksanaan pengujian PDA umumnya dilakukan setelah tiang memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan energi tumbukan dari palu. Apabila kekuatan tiang belum mencukupi, langkah mitigasi dapat dilakukan dengan menggunakan *cushion*, menurunkan tinggi jatuh palu, atau memakai palu dengan berat lebih besar untuk mengontrol energi benturan (Zainal et al., 2025).

Selama pengujian, PDA merekam regangan dan percepatan gelombang tegangan yang timbul akibat tumbukan tersebut. Data hasil pengujian kemudian

dianalisis menggunakan perangkat lunak CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*), yaitu metode analisis gelombang yang dikembangkan oleh *Case Western Reserve University*, untuk menentukan parameter tanah dan kapasitas dukung tiang berdasarkan karakteristik gelombang tegangan yang dihasilkan (Raudhati, 2025).

Adapun beberapa keuntungan metode pengujian PDA antara lain:

1. Memberikan hasil cepat dan akurat mengenai kapasitas dukung dinamis tiang tanpa perlu menunggu waktu lama seperti uji beban statis.
2. Dapat digunakan di lapangan secara langsung selama proses pemancangan, sehingga efisien dalam waktu dan biaya.
3. Mampu mengevaluasi integritas tiang, mendeteksi cacat atau retakan sepanjang batang tiang.
4. Memberikan informasi energi palu yang efektif, termasuk efisiensi transfer energi dari alat pemukul ke tiang.
5. Dapat digunakan untuk mengkalibrasi hasil uji beban statis, sehingga memberikan korelasi yang lebih komprehensif antara kapasitas dinamis dan statis.

Menurut standar ASTM D-4945-1996 (*Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations*), uji PDA dilakukan untuk menentukan daya dukung aksial tiang melalui analisis respons dinamis tiang terhadap gaya tumbukan dari palu. Dalam pengujian ini, beberapa variabel penting seperti tekanan ultimit (*ultimate bearing pressure*), gaya maksimum pada tiang, serta hubungan antara gaya dan deformasi (*pile-soil interaction*) dapat dihitung dan dianalisis.

Metode ini menggunakan data hasil pengukuran regangan (*strain*), gaya (*force*), percepatan (*acceleration*), kecepatan (*velocity*), atau perpindahan (*displacement*) yang terjadi pada tiang saat menerima gaya benturan. Data tersebut digunakan untuk memperkirakan kapasitas dukung (*bearing capacity*) dan integritas struktur tiang (*pile integrity*), sekaligus mengevaluasi kinerja palu (*hammer performance*), tegangan dalam tiang (*pile stresses*), serta karakteristik dinamis tanah, seperti koefisien redaman (*soil damping*) dan nilai deformasi awal (*quake value*) (*American Society for Testing and Materials*, 2008).

Pelaksanaan pengujian PDA biasanya dilakukan setelah tiang memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan energi tumbukan palu, atau setelah umur beton mencapai 28 hari.

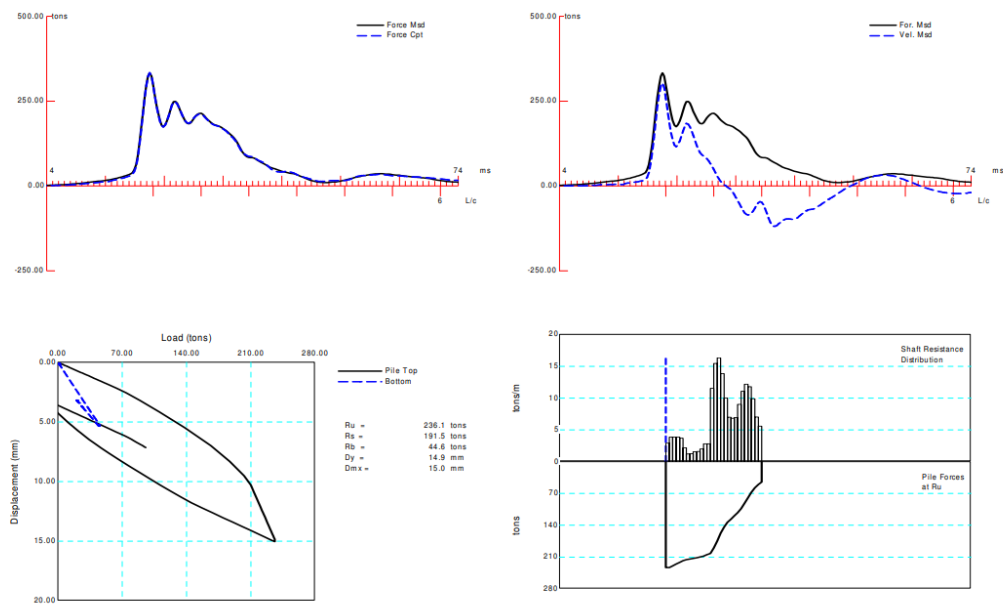
Pada pengujian dengan metode PDA terdapat beberapa parameter pendukung, yaitu:

1. CAPWAP (*Case Wave Analysis Program*)

Analisis CAPWAP merupakan tahap lanjutan dari pengujian PDA yang menggunakan metode *Signal Matching Analysis* (SMA) untuk mendapatkan hasil interpretasi yang lebih akurat dan rinci terhadap perilaku tiang. Program ini bekerja dengan memanfaatkan data gelombang tegangan dan percepatan yang direkam selama pengujian PDA, kemudian melakukan pencocokan sinyal antara hasil pengukuran lapangan dan hasil simulasi numerik berdasarkan persamaan gelombang (ASTM D-4945-1996).

Melalui analisis CAPWAP, diperoleh informasi yang lebih komprehensif mengenai:

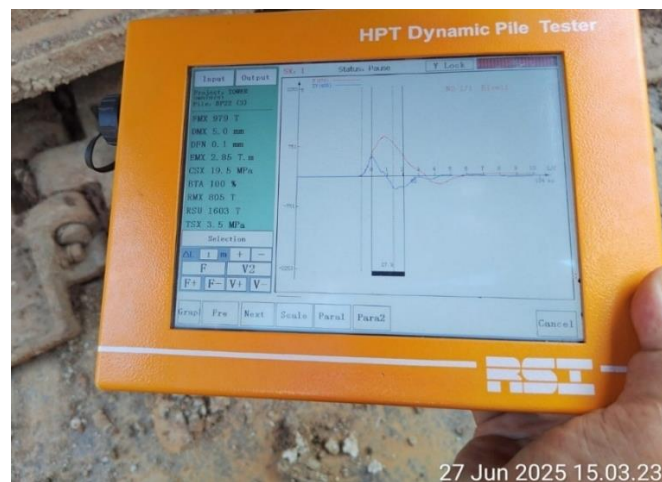
- a. Tahanan ujung tiang tunggal (*end bearing resistance*), yaitu besarnya kontribusi lapisan tanah keras di dasar tiang terhadap daya dukung total.
- b. Tahanan friksi tiang tunggal (*shaft friction resistance*), yaitu gaya gesek antara permukaan tiang dan tanah sepanjang batang tiang.
- c. Simulasi uji beban statis (*static loading test simulation*), yaitu estimasi perilaku tiang terhadap beban statis berdasarkan hasil analisis dinamis.



Gambar 2.11 Contoh Hasil Analisis CAPWAP

2. Data dan Parameter Pengujian PDA Test

Penghentian *re-strike* dan proses perekaman data dilakukan apabila penguji telah memastikan bahwa palu (*hammer*) telah mentransfer energi maksimum yang dapat dihasilkannya ke tiang. Hal ini bertujuan untuk menjamin bahwa data yang diperoleh mencerminkan respons maksimum tiang terhadap energi tumbukan, sehingga hasil analisis kapasitas dukung dan integritas tiang yang dihasilkan dari pengujian PDA dan CAPWAP menjadi lebih akurat dan representatif terhadap kondisi sebenarnya di lapangan.



Gambar 2.12 Alat Uji PDA

Tabel 2.13 Kode dan Keterangan pada Alat PDA

Kode	Keterangan
BN	Pukulan
RMX	Daya dukung tiang (ton)
FMX	Gaya tekan maksimum (ton)
CTN	Gaya tarik maksimum (ton)
EMX	Energy maksimum yang ditransfer (ton.m)
DMX	Penurunan maksimum (mm)
DFN	Penurunan permanen (mm)
STK	Tinggi jatuh palu (m)
BPM	Pukulan per menit
BTA	Nilai keutuhan tiang (%)
LE	Panjang tiang di bawah instrument (m)
LP	Panjang tiang tertanam (m)
AR	Luas penampang tiang (cm ²)

3. Refusal dan *Ultimate*

Pada pengujian PDA, hasil yang diperoleh dapat menunjukkan dua kondisi utama daya dukung tiang, yaitu daya dukung ultimit dan daya dukung refusal.

- a. Daya dukung refusal merupakan kondisi di mana nilai daya dukung yang terdeteksi berasal dari tiang yang belum sepenuhnya termobilisasi, artinya kapasitas maksimum tiang belum tercapai. Hal ini dapat terjadi apabila energi yang ditransfer oleh palu selama pengujian atau *re-strike* tidak cukup besar untuk memobilisasi seluruh daya dukung tanah terhadap tiang. Dengan demikian, data yang dihasilkan hanya menggambarkan kapasitas parsial, bukan kapasitas penuh (*ultimate capacity*).
- b. Daya dukung ultimit menggambarkan kondisi di mana tiang telah termobilisasi sepenuhnya, baik dari tahanan ujung maupun tahanan geseknya. Kondisi ini dapat tercapai apabila:

- 1) Tiang menunjukkan pergerakan akibat beban tertentu yang melampaui tahanan friksi dan ujung tiang (end bearing dan shaft friction).
- 2) Beban yang diterapkan telah melebihi kemampuan material tiang, sehingga peningkatan beban lebih lanjut dapat menyebabkan kerusakan material.

Kedua kondisi tersebut, baik refusal maupun ultimit, dapat diterima sepanjang daya dukung hasil pengujian memenuhi persyaratan faktor keamanan (*Safety Factor*) sesuai desain perencanaan. Dari beberapa data yang diperoleh selama pengujian PDA, biasanya diambil satu set data terbaik yang paling representatif terhadap kondisi aktual tiang, umumnya berasal dari energi transfer maksimum (EMX) yang tercatat selama *re-strike*.

4. Faktor Keamanan

Nilai faktor keamanan (*Safety Factor*) yang digunakan dalam interpretasi hasil PDA Tes umumnya sebesar 2,0 sesuai dengan ketentuan ASTM D-4945 (1996) dan pedoman FHWA (*Federal Highway Administration*).

Keterangan tambahan mengenai penerapan *Safety Factor* (SF):

- a. Pengujian dinamis memerlukan pencocokan sinyal (signal matching) melalui program CAPWAP.
- b. Dianjurkan adanya hubungan atau korelasi dengan uji beban statis.
- c. Rumus dinamis hanya valid untuk tanah pasir, tidak untuk tanah lempung jenuh.
- d. $SF < 2\%$ untuk hasil yang berkorelasi baik dengan uji statis.
- e. $SF > 1\%$ (statis) atau $> 3\%$ (dinamis) memerlukan evaluasi tambahan.
- f. SF lebih tinggi digunakan jika deformasi dinamis $< 3\%$ atau deformasi statis $< 1\%$.
- g. SF lebih rendah dapat diterapkan jika deformasi dinamis $> 15\%$ atau deformasi statis $> 3\%$, dengan catatan dilakukan investigasi tanah secara menyeluruh serta kontrol konstruksi yang ketat.
- h. Nilai SF dapat disesuaikan dengan jenis tiang, variasi kondisi tanah di lokasi, dan karakteristik pembebanan.
- i. Beberapa kondisi tertentu mungkin tidak relevan (NA) atau tidak direkomendasikan (NR) tergantung pada situasi lapangan.

2.5 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga merupakan metode yang membagi-bagi daerah yang akan dianalisis menjadi bagian-bagian yang kecil yang disebut dengan elemen. Analisis metode elemen hingga dapat dilakukan melalui perangkat lunak berbasis metode elemen hingga yang dirancang untuk memodelkan deformasi serta mengevaluasi stabilitas pada berbagai permasalahan geoteknik. Dalam praktek rekayasa geoteknik, evaluasi daya dukung aksial fondasi dilakukan melalui pendekatan empiris maupun metode numerik seperti metode elemen hingga (*finite element method*) (Potts et al., 1999).

Rumus dasar untuk metode elemen hingga menurut adalah sebagai berikut:

$$[K]\{u\} = \{f\} \quad (2.8)$$

Keterangan:

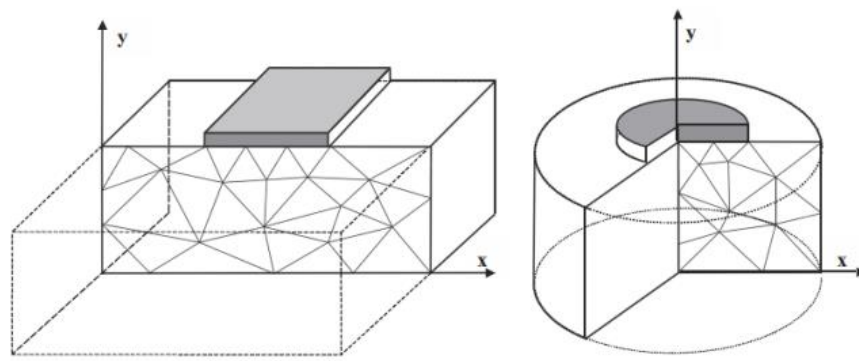
K = matriks kekakuan global pada struktur

u = vektor perpindahan atau deformasi yang terjadi pada setiap simpul (node)

f = vektor gaya atau beban yang diterapkan pada struktur

Konsep penerapan perangkat lunak analisis elemen hingga memerlukan pemodelan struktur serta pemberian data material yang merepresentasikan kondisi konstruksi (Abdullah, 2022). Salah satu perangkat lunak yang menerapkan metode ini adalah Program FEM 2D.

FEM 2D merupakan perangkat analisis berbasis metode elemen hingga yang dikembangkan untuk mempelajari deformasi serta stabilitas pada berbagai persoalan geoteknik (Mungkur et al., 2025). Dalam perangkat lunak ini, perhitungan dapat dilakukan menggunakan dua pendekatan utama, yaitu *axisymmetric* dan *plane strain*. Pendekatan *axisymmetric* digunakan untuk struktur yang memiliki bentuk radial atau melingkar dengan kondisi pembebanan simetris, sedangkan pendekatan *plane strain* umumnya diterapkan pada struktur yang dianalisis melalui penampang melintangnya. Pemilihan jenis mesh dan jumlah titik nodal menjadi faktor penting untuk mencapai ketelitian hasil.



Gambar 2.13 Pemodelan *Plain Strain* dan *Axisymmetric*